

doi :10.3969/j.issn.1005-3026.2016.07.028

超细全尾砂似膏体长距离自流输送的时变特性

李 帅,王新民,张钦礼,王 石  
(中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要:基于 H-B 流变模型和絮网结构理论,构建了考虑时变性的超细全尾砂似膏体流变模型,探究超细全尾砂似膏体长距离管道自流输送过程中的时变特性,推导了相应的管输阻力计算公式.以某深井铁矿质量分数为 68% 的超细全尾砂似膏体为例,进行了室内剪切试验和管输阻力计算.结果表明:不同剪切速率下的超细全尾砂似膏体表现出剪切稀化的时变特性,且剪切速率越大,达到平衡状态的时间越短,黏度值越低.在流量为 80 m<sup>3</sup>/h 时,管输阻力经 225 s 降至稳定状态的 5.03 MPa/km,为初始阻力的 50.6%.超细全尾砂似膏体长距离自流输送过程中,以稳定状态的阻力损失进行计算更为经济合理.

关 键 词:时变特性;H-B 流变模型;絮网结构理论;管输阻力损失;剪切稀化

中图分类号:TD 05 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)07-1045-06

Time-Varying Characteristic of Paste-like Super-Fine Unclassified Tailings in Long Self-Flowing Transportation

LI Shuai , WANG Xin-min , ZHANG Qin-li , WANG Shi  
( School of Resources and Safety Engineering , Central South University , Changsha 410083 , China. Corresponding author : LI Shuai , E-mail : 15200826420@163.com )

**Abstract** : A time-dependent rheological model was built based on the H-B rheological model and the slurry flocculent structure theory. Time-varying characteristic of paste-like super-fine unclassified tailings in long self-flowing transportation was explored , and the friction loss formula of pipes was derived. By using the 68% mass concentration paste-like slurry of a deep iron mine , groups of shear rheological tests were implemented , and the pipes friction loss was verified. It is revealed that the paste-like super-fine unclassified tailings show obvious shear thinning under different shear rate. The higher the shear rate is , the faster the balance can be reached and the lower the viscosity is. With a flow of 80 m<sup>3</sup>/h , the friction loss takes 225 s to reach a stable value of 5.03 MPa/km , which is just 50.6% of the initial resistance. Therefore , it is quite economic and reasonable to calculate the friction loss of paste-like slurry by using the stable value in long distance pipeline transportation.

**Key words** : time-varying characteristic ; H-B rheological model ; flocculent structure theory ; friction loss of pipes transportation ; shear thinning

随着絮凝沉降和活化搅拌技术的迅速发展,超细粒径级尾砂沉降和浓密问题得到了有效解决,高浓度超细全尾砂充填技术应运而生.似膏体充填技术继承了一般水力充填料浆流动性能好、易于管道输送的优点,同时又兼具膏体充填浓度高、井下脱水少、充填质量好、强度高的优势,符合安全、环保和低能耗的无废害开采发展新方向.在超细全尾砂似膏体长距离自流输送过程中,合理的流变模型选取与准确的输送阻力计算<sup>[1]</sup>直接关系到整个充填系统运行的可靠性和经济合理性.

在以往的应用研究中,似膏体被简化为流动特性与时间无关的宾汉体,并在非时变特性的前提下,进行相应的管道阻力计算<sup>[2]</sup>.近年来,越来越多的研究表明:高浓度超细全尾砂浆体的流变性具有明显的时变行为.3 参数的 H-B 流变模型较 2 参数的宾汉模型适用范围更广、精度更高.

Pornillos 研究发现高浓度铅锌尾砂浆体的屈服应力和黏度随剪切时间增加而逐渐减小 ,并最终趋于稳定<sup>[3]</sup>. 胡文达等将 H - B 流变模型运用在谦比希铜矿超细全尾砂浆临界浓度的确定上<sup>[4]</sup>. 但是这些研究仅停留在定量描述的初级阶段 ,如何对超细全尾砂似膏体流变性能的时变特征进行深入、准确的定量计算并用于指导工程实践 ,成为现阶段亟待解决的问题. 本文结合超细全尾砂似膏体的微观结构 ,基于 3 参数 H - B 流变模型构建考虑似膏体时变性的流变模型 ,并进行相应的管道输送阻力计算和验证.

## 1 超细全尾砂似膏体流变模型

### 1.1 超细全尾砂似膏体充填

传统的水力充填工艺 ,料浆浓度低 ,充填体进入采场后脱水量大 ,水泥流失严重 ,充填体强度降

低 ,且极易污染井下环境. 质量分数超过 75% 的全尾砂膏体脱水量少 ,填体强度高且水泥消耗量少 ,但也存在充填系统投资高、技术难度大、需大功率泵送设备、充填管道容易堵塞等问题 ,其工艺特性对比见表 1. 似膏体充填技术在保持高浓度输送的同时兼顾流动性 ,且充填质量好、强度高 ,胶凝材料成本低、设备投资小 ,推广应用价值高<sup>[5]</sup>.

### 1.2 超细全尾砂似膏体流变模型

作为典型固液两相流态充填体 ,超细全尾砂浆体的尾砂成分、粒径级配和水灰比等因素直接影响浆体的流变特性和管输性能<sup>[6]</sup>. 当浆体浓度不高时 ,其剪切速率与切应力关系为通过坐标轴原点的直线 ,这种流体即为典型的牛顿体. 当浆体浓度较高 ,尤其是含有较多细粒径颗粒时 ,剪切速率与切应力关系表现出非线性的特点 ,这种流变模型的浆体即为非牛顿体. 根据流变特性不同 ,非牛顿体又分宾汉体、伪塑性体和膨胀体<sup>[7]</sup>.

表 1 胶结充填工艺特征比较  
Table 1 Characteristics of different cemented filling technology

| 技术指标  | 水力充填    | 似膏体充填     | 膏体充填       |
|-------|---------|-----------|------------|
| 质量分数  | 60% 以下  | 60% ~ 75% | 75% 以上     |
| 流型、流态 | 牛顿体非均质  | 非牛顿体似均质   | 非牛顿体似均质    |
| 流动性   | 流动性好    | 流动性好      | 流动性差 ,整体移动 |
| 输送形式  | 自流输送、泵送 | 自流或低压泵送   | 高压泵输送      |
| 脱水性   | 大量脱水    | 微量或不脱水    | 微量或不脱水     |
| 强度特性  | 抗压抗剪均低  | 抗压抗剪均高    | 抗压抗剪均高     |
| 投资    | 小       | 较小        | 最大         |
| 技术难度  | 小       | 较小        | 最大         |

相对于 2 参数的宾汉流变模型 ,3 参数的 H - B 流变模型充分考虑了浆体剪切过程中的时变特性 ,将剪切稀化和剪切增稠纳入切应力计算中 ,因而 H - B 流变模型精度更高 ,适用范围更广<sup>[8]</sup>. H - B 流变模型通式如下 :

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}^n. \tag{1}$$

式中 : $\tau$  为剪切应力 ,Pa ; $\tau_0$  为初始屈服应力 ,Pa ; $\eta$  为黏度 ,Pa · s ; $\dot{\gamma}$  为剪切速率 ,s<sup>-1</sup> ; $n$  为流变指数.  $n > 1$  为膨胀体 ,具有剪切变稠特性 ; $n < 1$  为伪塑性体 ,呈现剪切稀化状态 ; $n = 1$  为宾汉体.

## 2 考虑时变性的 H - B 流变模型

### 2.1 超细全尾砂似膏体的絮网结构

超细全尾砂似膏体中含有大量的细粒径成分 ,在絮凝剂 (聚丙烯酰胺)分子的作用下发生吸附、电中和、搭桥、网捕等一系列的物理化学变化 ,

进而絮凝沉降形成稳定的“絮团”结构<sup>[9]</sup>. 同时 ,在管道输送过程中 ,浆体中的絮网结构在管壁摩擦等外力作用下又会不断地被破坏. 絮网结构随时间不断发生修复和破坏的动态变化过程可描述为

$$\frac{dS}{dt} = k_1(1 - S) - k_2S\dot{\gamma}. \tag{2}$$

式中 : $S$  为絮网结构系数 ; $k_1$  为修复系数 ,固定絮凝剂耗量条件下其值恒定 ; $k_2$  为破坏系数 ,与剪切速率  $\dot{\gamma}$  成正比 ;定义  $S = 0$  为絮网结构完全破坏 , $S = 1$  为絮网结构发育完全 ,则动态平衡的结构系数  $S_0$  :

$$S_0 = k_1 / (k_1 + k_2\dot{\gamma}). \tag{3}$$

对式 (2) 两边积分可得到结构系数  $S$  随时间和剪切速率的变化规律为

$$S = \frac{k_1 + k_2\dot{\gamma}e^{-(k_1 + k_2\dot{\gamma})t}}{k_1 + k_2\dot{\gamma}} = S_0 + \frac{k_2\dot{\gamma}}{k_1 + k_2\dot{\gamma}}e^{-(k_1 + k_2\dot{\gamma})t}. \tag{4}$$

由式 (4) 可知 ,固定配比和质量分数的超细

全尾砂似膏体絮网结构具有明显的时变性 :在一定的剪切速率条件下 ,絮网结构系数  $S$  随着剪切时间的增加而逐渐减小 ,并最终趋于平衡值  $S_0$  .

2.2 考虑时变性的 H - B 流变模型

基于 H - B 流变模型和絮网结构理论 ,超细全尾砂似膏体的初始屈服应力  $\tau_0$  ,黏度  $\eta$  和流变指数  $n$  随剪切速率  $\gamma$  和时间  $t$  变化的数学模型可表达为

$$\tau_0 = S\tau_1 \quad \eta = \eta_1 + Sk_3 \quad n = Sn_1 \quad , \quad (5)$$

$$\tau = S\tau_1 + (\eta_1 + Sk_3) \gamma^{Sn_1} . \quad (6)$$

式中  $\tau_1$  和  $n_1$  分别为浆体结构未被破坏时的屈服应力和流变指数 ; $\eta_1$  为浆体结构完全破坏时的黏度  $k_3$  为絮网结构的黏度系数.

联立式 (2) 和式 (6) 可知 ,考虑时变性的 H - B 流变模型中 ,超细全尾砂似膏体的剪切应力是关于  $\tau_1 \quad \eta_1 \quad n_1 \quad k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad \gamma$  和  $t$  的多元函数. 多元函数中各时变参数可通过浆体恒剪切试验获得 :在剪切率  $\gamma$  持续作用下 ,经过  $t$  达到稳定的平衡切应力  $\tau$  和絮网结构平衡值  $S_0$  . 将其代入式 (5) 和式 (6) ,构建方程组求解.

2.3 考虑时变性的管道输送阻力计算

沿程阻力损失作为管道水力输送中最重要的水力参数之一 ,直接关系到动力设备的选型和运行的能耗. 超细全尾砂似膏体在外力的作用下 ,克服初始屈服应力 ,在管道内呈似均质流态流动 ,管道与浆体间的相对运动是管壁切应力和沿程阻力损失产生的根本原因. 浆体流速越大 ,管壁与流体间剪切速率越大 ,对应的切应力和沿程阻力损失越大. 大多数工程应用计算过程中 ,超细全尾砂似膏体常常被假设为一种与时间无关的宾汉流体 ,并由此推导沿程阻力损失的计算公式 :

$$i_0 = \frac{16}{3D} \tau_0 + \frac{32\nu}{D^2} \eta . \quad (7)$$

式中  $i_0$  为管道沿程阻力损失 ,Pa/m ; $D$  为管径 ,m ; $\nu$  为管道平均流速 ,m/s.

超细全尾砂似膏体管输过程中 ,由于输送距

离较长 (数百米至数千米) ,似膏体与管壁之间发生持续的剪切作用 ,因而浆体在管输过程中具有明显的时变性. 王劼等<sup>[10]</sup> 以云南会泽铅锌矿为例 ,基于非时变的宾汉体模型 ,计算出似膏体料浆管道输送阻力损失的误差区间为 10% ~ 25% ,最高竟达 45% . 因而忽略浆体时变性能的管输阻力计算已难以满足生产要求 ,需要采用精度更高、适用范围更广的 H - B 流变模型. 结合超细全尾砂似膏体的絮网结构 ,联立以上方程式 ,考虑时变性的 H - B 流变模型中各时变参数可表示为

$$\tau_0 = S_0\tau_1 + ae^{-(k_1+k_2\gamma)t} \quad a = \tau_1 k_2 \gamma / (k_1 + k_2 \gamma) \quad ; (8)$$

$$\eta = \eta_1 + S_0 k_3 + be^{-(k_1+k_2\gamma)t} \quad b = k_2 k_3 \gamma / (k_1 + k_2 \gamma) \quad ; (9)$$

$$i_0 = \frac{16}{3D} S_0 \tau_1 + \frac{32\nu}{D^2} (\eta_1 + S_0 k_3) + \left( \frac{16}{3D} a + \frac{32\nu}{D^2} b \right) e^{-(k_1+k_2\gamma)t} . \quad (10)$$

式中  $a \quad b$  为简化参数.

由式 (8) ~ 式 (10) 可知 ,在固定流速对应的剪切率  $\gamma$  条件下 ,屈服应力  $\tau_0$  ,黏度  $\eta$  和沿程阻力损失  $i_0$  均是关于时间  $t$  的减函数. 随着输送时间的增加 ,浆体逐渐由不稳定流态向稳定流态过渡 ,并在某一时刻浆体内絮网结构达到动态平衡 ,黏度和管道输送阻力亦达到稳定值.

3 工程实例

3.1 超细全尾砂似膏体流变特性试验

国内某深井铁矿将选厂质量分数为 20% 的超细全尾砂浆体泵送至深锥浓密机内 ,絮凝沉降后获得质量分数为 68% 似膏体底流 ,自流输送至空区. 输送管线长 3 000 m ,管径 160 mm ,流量 80 ~ 100 m<sup>3</sup>/h. 似膏体中全尾砂颗粒的粒径组成见表 2 . 尾砂松散干密度为 0. 887 g/cm<sup>3</sup> ,粒径组成中 0. 075 mm 以下颗粒占 79% 以上 ,中值粒径仅为 0. 019 mm ,不均匀系数为 7 ,属典型的超细全尾砂.

表 2 超细全尾砂似膏体的粒径组成  
Table 2 Grain diameters of super-fine unclassified tailings

|        |       |          |              |                |                |                |          |
|--------|-------|----------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------|
| 粒径/mm  | 5 ~ 2 | 2 ~ 0. 5 | 0. 5 ~ 0. 25 | 0. 25 ~ 0. 075 | 0. 075 ~ 0. 05 | 0. 05 ~ 0. 005 | < 0. 005 |
| 质量分数/% | 0. 3  | 3. 3     | 6. 8         | 2. 5           | 6. 1           | 63             | 13       |

室内剪切试验采用德国哈克 VT550 旋转黏度计 ,相对于传统的旋转黏度计 ,十字形转子对样品的絮网结构破坏较小 ,有效地克服了圆柱面的滑移效应 ,大大提高了测量精度. 与计算机同步相连的数据加载和分析软件 ,可以最大程度地检测

和记录剪切试验过程中各项流变参数的微小变动. 质量分数为 68% 的超细全尾砂似膏体经均匀搅拌后放置于流变仪下 ,剪应力从 0 开始缓慢加载 ,至转子开始转动时的剪切应力为初始屈服应力. 更换转子类型 ,测定不同剪切速率下浆体的黏

度和剪切应力的变化,测试时长约 10 min.

3.2 试验结果分析

在剪切速率分别为 10、20、30、40、50 s<sup>-1</sup> 的条件下,室内剪切试验测得浆体剪切应力和黏度的变化分别如图 1 和图 2 所示.

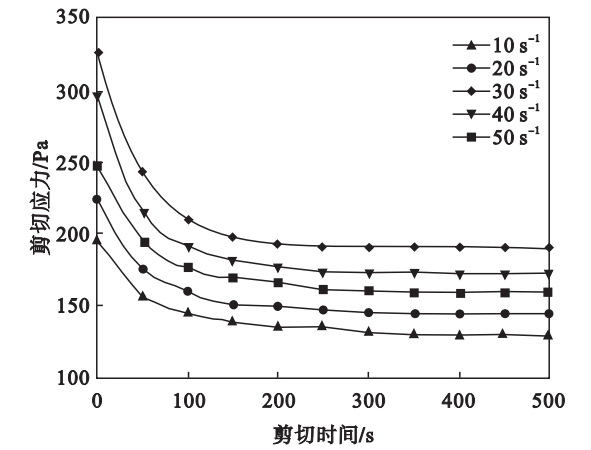


图 1 剪切应力随剪切时间的变化规律  
Fig. 1 Variation of shear stress along with shearing time

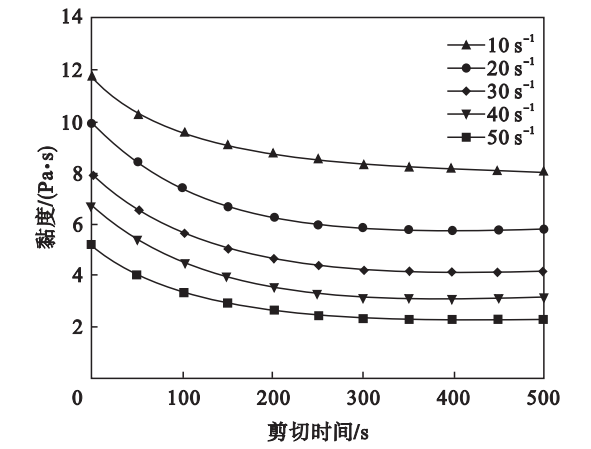


图 2 黏度随剪切时间的变化规律  
Fig. 2 Variation of viscosity along with shearing time

由图 1、图 2 可知,不同剪切速率条件下的超细全尾砂似膏体表现出明显剪切稀化时变特性,其黏度和剪切应力均随剪切时间的增加而逐渐减

小,并逐渐趋于稳定值.且剪切速率越大,浆体达到平衡状态的时间越短,剪切应力越大.极限黏度值越小.当剪切速率为 10 s<sup>-1</sup> 时,经过 412 s 浆体的剪切应力和黏度均达到稳定值 131.2 Pa 和 8.1 Pa·s;当剪切速率为 50 s<sup>-1</sup> 时,只需 220 s 即可达到平衡状态的稳定值 190.4 Pa 和 2.3 Pa·s.这是因为剪切速率越大,浆体所受外力搅拌作用越强,浆体内部絮网结构破坏越严重,剪切稀化的时变特性就越明显.

各剪切速率条件下试验结果如表 3 所示.将表中数据代入式(6),可得一个五元非线性方程组,采用线性回归优化计算各时变参数的最优解为

$$\tau = f(\tau_1, \eta_1, n_1, k_1, k_2, k_3, \gamma, t) = f(126.5, 2.25, 0.95, 7.25 \times 10^{-3}, 3.31 \times 10^{-4}, 1.88, \gamma, t). \quad (11)$$

| 表 3 剪切流变试验结果                               |       |       |       |       |       |  |
|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| Table 3 Results of shear rheological tests |       |       |       |       |       |  |
| 剪切速率/s <sup>-1</sup>                       | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    |  |
| 初始屈服应力/Pa                                  | 126.5 | 125.2 | 126.9 | 128.4 | 127.5 |  |
| 平衡黏度/(Pa·s)                                | 8.1   | 5.8   | 4.2   | 3.1   | 2.3   |  |
| 平衡时间/s                                     | 412   | 346   | 288   | 246   | 220   |  |
| 平衡切应力/Pa                                   | 131.2 | 145.6 | 160.7 | 172.3 | 190.4 |  |

最优解条件下,超细全尾砂似膏体在剪切速率为 30、50、70 s<sup>-1</sup> 的剪切应力预测值与实测值对比如图 3 所示.从图中可以看出,3 参数的 H-B 流变模型较为准确地描述了超细全尾砂似膏体在剪切过程中剪切稀化的时变特性,且误差更小、精度更高.

3.3 管道输送阻力计算

国内某深井铁矿质量分数为 68% 的超细全尾砂似膏体,自流输送管线长 3 000 m,管径 160 mm,系统流量 80~100 m<sup>3</sup>/h.不同流量状态对应的流速进行剪切速率换算后,代入式(8)~式(11)可计算各流变参数见表 4.不同的流量状态下,基于 H-B 流变模型的超细全尾砂似膏体管输阻力变化的时变特性对比如图 4 所示.

| 表 4 H-B 流变模型参数计算                            |                   |                 |       |      |                      |                      |                     |
|---------------------------------------------|-------------------|-----------------|-------|------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Table 4 Parameters of H-B rheological model |                   |                 |       |      |                      |                      |                     |
| 流量 Q                                        | 流速 v              | 剪切速率            | 无量纲参数 |      | 阻力最大值 i <sub>m</sub> | 平衡阻力值 i <sub>0</sub> | 平衡时间 t <sub>0</sub> |
| m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>             | m·s <sup>-1</sup> | s <sup>-1</sup> | a     | b    | MPa·km <sup>-1</sup> | MPa·km <sup>-1</sup> | s                   |
| 80                                          | 1.11              | 55.5            | 90.7  | 1.35 | 9.92                 | 5.03                 | 225                 |
| 90                                          | 1.24              | 62.0            | 93.5  | 1.39 | 10.61                | 5.34                 | 210                 |
| 100                                         | 1.38              | 69.0            | 96.0  | 1.43 | 11.33                | 5.67                 | 197                 |

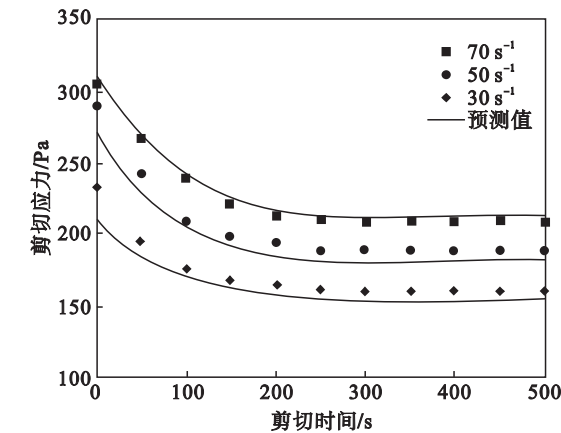


图 3 模型预测值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of predicted values and measured values

从图 4 可以看出,超细全尾砂似膏体管输沿程阻力损失随着输送时间的增加而逐渐降低.在流量为  $80\text{ m}^3/\text{h}$  时,充填系统经过  $4\text{ min}$  左右达到稳定输送的状态,输送阻力由初始状态的  $9.92\text{ MPa/km}$  降至稳定状态的  $5.03\text{ MPa/km}$ ,降幅高达  $49.4\%$ .平均流速为  $1.11\text{ m/s}$  的超细全尾砂似膏体在长约  $3\,000\text{ m}$  的管线中自流输送,约需  $40\text{ min}$  才能从地表达达到充填采场,因此以管输阻力的稳定值  $5.03\text{ MPa/km}$  进行计算更为经济合理.

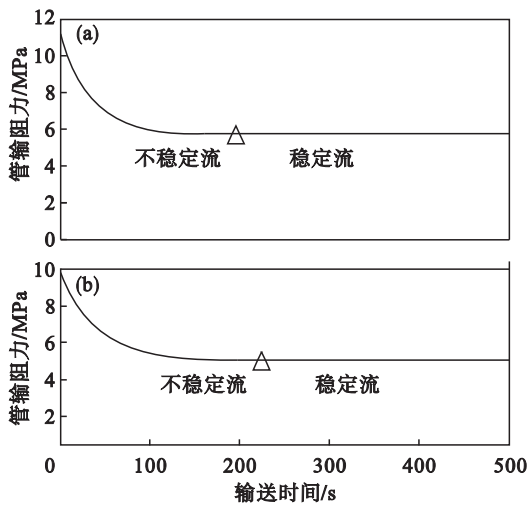


图 4 管输阻力随输送时间的变化规律

Fig. 4 Variation of friction loss along with transportation time

(a)— $Q = 100\text{ m}^3/\text{h}$   $t = 197\text{ s}$   $i = 5.67\text{ MPa}$  ;  
(b)— $Q = 80\text{ m}^3/\text{h}$   $t = 225\text{ s}$   $i = 5.03\text{ MPa}$ .

为评价和验证超细全尾砂似膏体 H-B 流变模型时变状态下管输阻力计算结果的可信度,采用国内目前常用的不考虑浆体时变特性的阻力损失经验公式,金川公式和陕西省水利科学研究院公式,分别计算了上述充填料浆不同流量状态下管道沿程阻力损失,见表 5.

| 表 5 不同经验公式计算的沿程阻力损失对比                                                        |                              |                                       |      |       |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------|-------|
| Table 5 Results of friction losses according to different empirical formulas |                              |                                       |      |       |
| 流量 $Q$                                                                       | 流速 $v$                       | $i_0/(\text{MPa}\cdot\text{km}^{-1})$ |      |       |
| $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$                                               | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | H-B 模型                                | 金川公式 | 水利院公式 |
| 80                                                                           | 1.11                         | 5.03                                  | 6.85 | 7.11  |
| 90                                                                           | 1.24                         | 5.34                                  | 6.92 | 7.25  |
| 100                                                                          | 1.38                         | 5.67                                  | 7.02 | 7.30  |

计算结果表明:不同流量、流速的超细全尾砂浆体在 H-B 流变模型状态下计算的管输阻力较金川公式低约  $30\%$ ,较水利科学研究院公式计算结果低约  $40\%$ ,计算结果与室内试验结果和充填管输的实际情况相互验证,更加合理可信.

4 结 论

1) 内部絮网结构的动态变化是超细全尾砂似膏体长距离管道输送过程时变特性产生的原因.3 参数的 H-B 流变模型充分考虑了浆体剪切过程中的时变特性,将剪切稀化纳入切应力计算中,因而较 2 参数的宾汉模型适用范围更广、精度更高.

2) 采用德国哈克 VT550 旋转黏度计进行超细全尾砂似膏体的室内剪切试验.浆体黏度和剪切应力均随剪切时间的增加而逐渐减小,并逐渐趋于稳定值.且剪切速率越大,浆体所受外力搅拌作用越强,浆体内部絮网结构破坏越严重,进而达到平衡状态的时间越短,剪切应力越大,极限黏度值越小,剪切稀化的时变特性就越明显.

3) 考虑时变性的国内某深井铁矿超细全尾砂似膏体管输阻力计算结果表明:在流量为  $80\text{ m}^3/\text{h}$  时,充填系统经过  $4\text{ min}$  左右管输阻力逐渐降至稳定状态的  $5.03\text{ MPa/km}$ ,为初始阻力的  $50.6\%$ .长距离自流管输过程中,以稳定状态的沿程阻力损失计算更为经济合理.